

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0658.2024.40.069

柴达木盆地北缘砂岩型铀矿目标层地球物理特征与找矿预测

赵旭, 时志浩, 郝昭, 陈擎

(核工业二〇三研究所, 陕西 西安 710086)

[摘要] 柴达木盆地北缘地处柴北缘拗陷构造带, 区内砂岩型铀矿成矿条件优越, 具有较大的铀成矿潜力。文章基于铀矿地质条件, 综合利用测井、能谱测量、活性炭、可控源音频大地电磁方法 (Controlled Source Audio Magnetotelluric, CSAMT), 总结目标层岩石物性、区内放射性特征, 且选择典型剖面进行CSAMT实测, 针对柴北缘铀成矿环境地球物理特征进行研究分析, 并进行找矿预测。研究表明: 区内目的层上干柴沟组骨架砂体发育较好, 泥-砂-泥三元结构反映清晰, 岩石物性变化明显, 目的层灰色还原砂体 (细砂岩、粗砂岩) 中铀背景值高; 典型剖面特征显示, 区内呈现高铀、高钍、低钾的放射性特征, 而铀矿化所赋存的目标砂体一般呈中高阻特征。文章根据地质-地球物理响应特征推断, 区内电性剖面上中高阻电性层和地表目的层放射性异常之间、铀异常带局部膨大部位为找矿的有利部位, 为柴北缘砂岩型铀矿勘查提供重要技术参考。

[关键词] 柴达木盆地北缘; 砂岩型铀矿; 地球物理特征; 找矿预测

[文章编号] 1000-0658(2024)04-0773-12 **[中图分类号]** P631 **[文献标志码]** A

从20世纪90年代开始, 伴随着我国国防科技和核能的大力发展, 铀矿需求日益增大, 我国铀矿勘探已逐渐由“硬岩型”向可地浸的北方“砂岩型”转变, 并不断加强砂岩型铀矿成矿理论研究, 扩大找矿范围^[1-3]。柴达木盆地北缘地处柴北缘拗陷构造带, 受逆冲推覆构造作用, 在中新生代盆地中形成了多种构造样式的断块构造, 具有优越的形成砂岩型铀矿层间氧化带的构造环境, 目的层砂体发育, 并含有油气等还原产物, 具有很大的成矿潜能。前人对柴达木盆地北缘砂岩型铀矿找矿目的层主要集中在侏罗系地层, 但该层构造改造强烈, 埋深较大, 找矿难度较大。近年来, 可地浸砂岩型铀矿在三新 (新地区、新类型和新层系) 找矿理念的指引下, 随着核工业地质系统对柴达木盆地北缘铀矿找矿工作加大工作力度, 柴北缘古-新近系发现多处铀矿化点 (带), 铀矿找矿取得重大突破, 其相应勘

探方法与成矿理论研究取得显著成果。

地球物理勘查方法是探测砂岩型铀矿主要控矿要素深部发育特征的有效手段, 尤其对目的层及其砂体、断裂定位和发现放射性异常等具有不可替代的重要作用。吴光大等^[4]综合分析了盆地重力场、磁场以及展布特征, 探究地下构造的地球物理响应; 潘语录^[5]总结分析柴北缘含煤区各种岩性的测井响应特征, 以煤层为标志层, 研究不同岩性在伽马-伽马、自然伽马、电阻率等测井曲线上的特征变化, 为砂岩型铀矿测井提供有效参考; 张建太^[6]基于柴北缘地区磁测资料, 结合地质构造背景, 运用多种边界识别方法提取磁异常信息, 研究区内构造演化特征; 艾虎等^[7]在柴北缘地区利用可控源音频大地电磁方法探测, 并结合钻探测井资料加以对比分析, 研究区内深部目的层砂体空间展布特征, 为查明目的层砂体埋深、产状及厚度奠定了理论基础。陈聪等^[8]综合运用音

[基金项目] 中国铀业有限公司-东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合基金 (编号: 2022NRE-LH-17) 和中国核工业地质局项目 (编号: 202219-1 和 202319-7) 联合资助。

[收稿日期] 2023-12-19 **[改回日期]** 2024-03-13

[第一作者] 赵旭 (1990—), 男, 2012年毕业于中国地质大学 (北京), 获学士学位, 工程师, 主要从事铀矿地球物理勘探与方法研究。E-mail: zhao_zx1w@163.com

[通信作者] 时志浩 (1994—), 男, 2019年毕业于中国矿业大学 (北京), 获硕士学位, 工程师, 主要从事铀矿地球物理勘探与方法研究。E-mail: shizhihao2671@163.com

频大地电磁和磁法测量查明鱼卡地区构造发育情况以及深部侏罗系地层展布特征,结合区内地质条件,总结归纳了区内铀成矿有利条件和找矿标志。众多学者基于地球物理勘探对柴达木盆地北缘深部地层、断裂构造展布等做了针对性研究,并取得一定的找矿效果,但研究区砂岩型铀矿地球物理方面研究成果相对较少,对于目的层地球物理特征与铀成矿之间的关系未作详细研究。

本文针对柴北缘铀矿地质背景,综合利用地球物理测井资料,总结了研究区目标层不同岩性地球物理测井物性特征;并结合 1:1 万地质-伽马能谱典型剖面测量和活性炭探测结果,分析该区目的层岩性、主砂体地球物理特征与深部铀异常的相关性,预测成矿有利区;针对有利区段采用可控源音频大地电磁探测区内深部目的层砂体空间展布特征,大致查明盆地深部断裂构造发育特征,进行深部成矿预测,为该区铀矿找矿提供技术支持。

1 研究区地质概况

柴达木盆地受祁连山、昆仑山、阿尔金山 3 大山系的长期影响,构造运动致使盆地变形十分强烈,形成复杂构造格局^[9]。盆地发育北西向与东北向深大断裂,呈现东西分区与南北分带的构造特征,整体可划分为柴西缘坳陷、柴北缘坳陷和三湖坳陷 3 个一级构造单元^[10]。

研究区地处柴达木盆地北缘,位于柴北缘坳陷构造单元,西起阿尔金山,南以鄂东-胡北-陵间-埃南断裂为界与柴西坳陷、三湖坳陷相隔,北部西段以大、小赛什腾山为界,东以宗务隆山为界,盆山之间为断裂接触^[11]。受断裂构造控制明显,具体表现为由北向南构造变形由强变弱,由复杂至简单,由东向西,以走滑断裂为界,不同构造区块,构造组合样式及构造特征不同(图 1)。中生界盖层的构造结构总体呈现稳定的构造斜坡带,因此区内具备良好的形成砂岩型铀矿层间氧化带的构造条件^[12]。

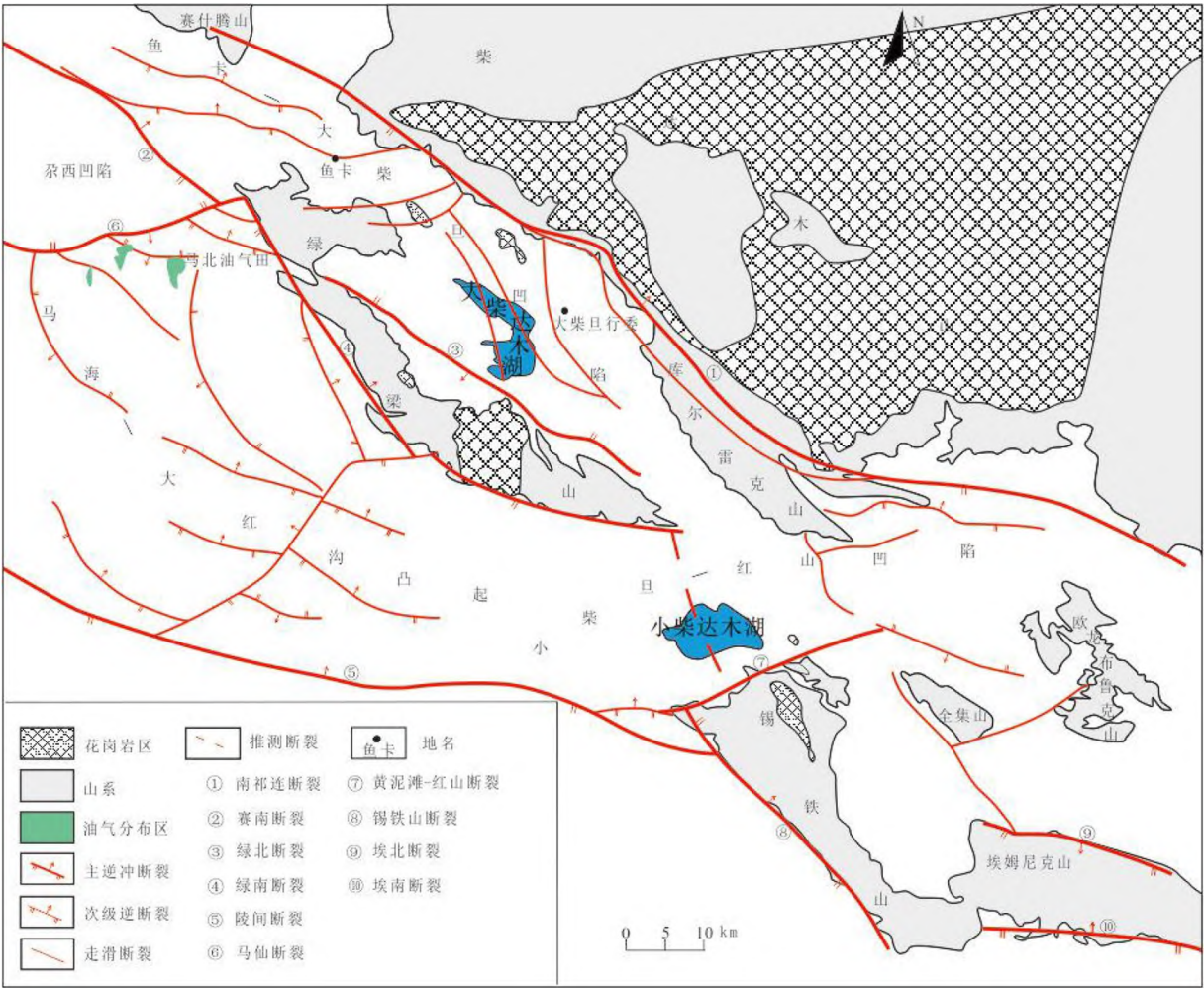


图 1 柴北缘地区构造纲要图

Fig.1 Structural outline map of the northern margin of Qaidam

2 铀矿地质特征

研究区铀源主要来自于盆地周缘柴达木山、绿梁山(图2)。柴达木山出露有大面积中酸性花岗岩体(面积约2 100 km²)和基性-超基性火山岩以及元古界、古生界基底变质岩系,铀元素含量较高,普遍大于3.5×10⁻⁶,可提供丰富铀源。中酸性的侵入岩以及元古界和古生界的变质岩富铀,侵入岩铀平均含量为10.5×10⁻⁶,最高达20.4×10⁻⁶;元古界和古生界

的变质岩铀平均含量为7.0×10⁻⁶,最高可达11.6×10⁻⁶。它们不仅构成盆地含铀层的主要物源,也为后期渗入型含铀含水地下水的形成及铀成矿提供着主要的铀源。

需要指出的是,盆地中生代侏罗系地层中平均铀含量3.74×10⁻⁶,钍含量11.85×10⁻⁶,为高钍低铀区,钍/铀平均值3.17;上干柴沟组铀含量为(1.60~2.80)×10⁻⁶,是有利的富铀层。含矿层本身的活化也为后生铀成矿提供着重要的铀源。

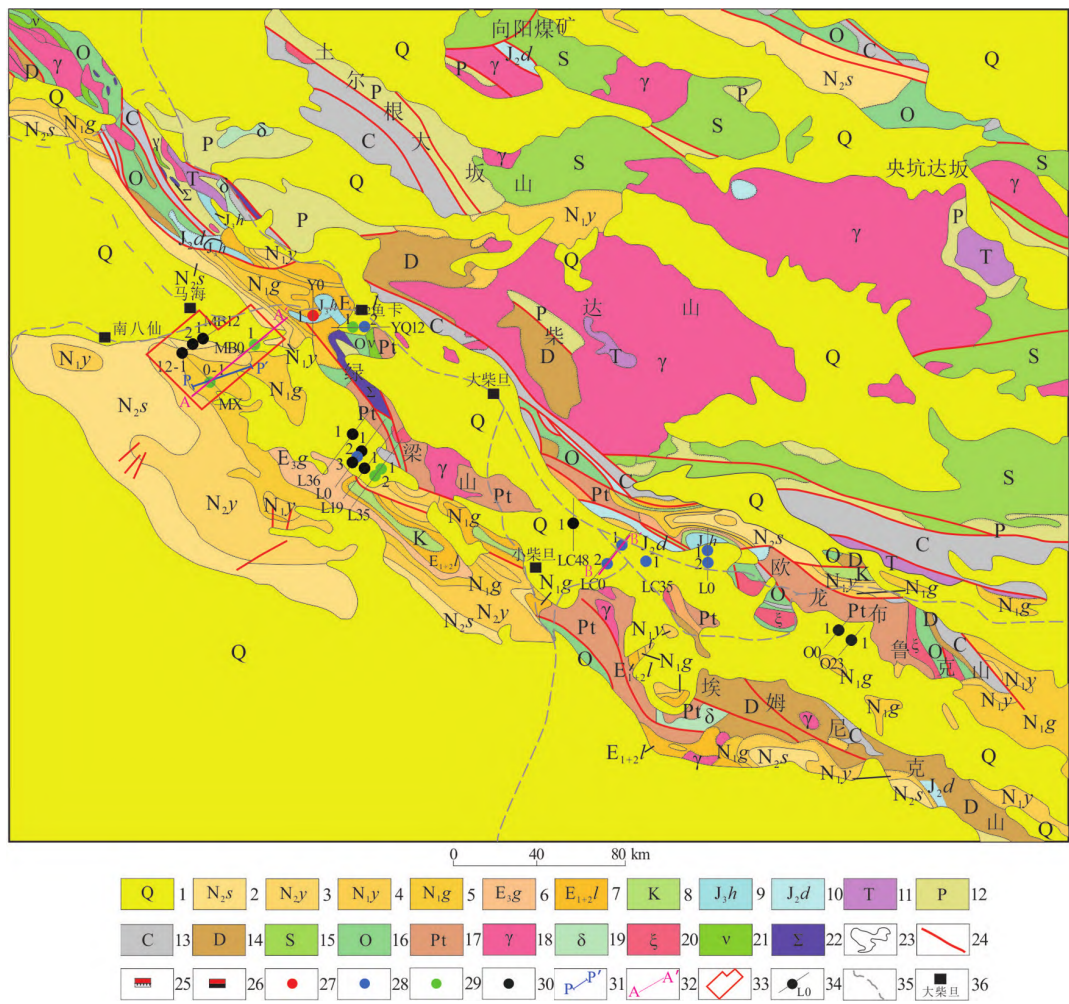


图2 柴达木盆地北缘铀矿地质图

Fig.2 Uranium geologic map of the northern margin of Qaidam Basin

1—第四系;2—新近系上新统狮子沟组;3—新近系上新统上油砂山组;4—新近系中新统下油砂山组;5—新近系中新统上干柴沟组;6—古近系渐新统下干柴沟组;7—古近系古-始新统路乐河组;8—白垩系;9—上侏罗统红水沟组;10—中侏罗统大煤沟组;11—三叠系;12—二叠系;13—石炭系;14—泥盆系;15—志留系;16—奥陶系;17—古元古界达肯达坂群;18—花岗岩;19—闪长岩;20—正长岩;21—辉长岩;22—超基性岩;23—地层界线;24—断层;25—砂岩型铀矿点;26—煤岩型铀矿点;27—工业铀矿孔;28—矿化孔;29—异常孔;30—无矿孔;31—能谱-地质剖面位置;32—CSAMT测线位置;33—活性炭测量范围;34—钻孔剖面及编号;35—公路;36—地名。

研究区内砂岩型铀矿古-新近系找矿目的层为上干柴沟组(N₁g),其具有典型陆相沉积特征,总体为一套半潮湿-半干旱环境下的陆相碎屑岩建造,

由盆地中心向盆缘碎屑粒度逐渐变细;沉积相类型较为复杂,围绕不同沉积中心发育冲积扇、辫状河三角洲和滨浅湖相沉积体系^[13]。

图3为研究区上干柴沟组粒度概率累积曲线图,钻孔位置见图2。由图3中可见,砂岩的主要粒度集中于0.125~0.500 mm左右,粒度概率的累计曲线呈四段型,由跳跃、悬浮形态构成。其中,跳跃式砂岩粒度为第一形态,约为80%~90%,主要岩性以细砂岩和中砂岩为主;悬浮式约占10%~20%,岩石岩性以泥质粉砂岩、泥岩为主。

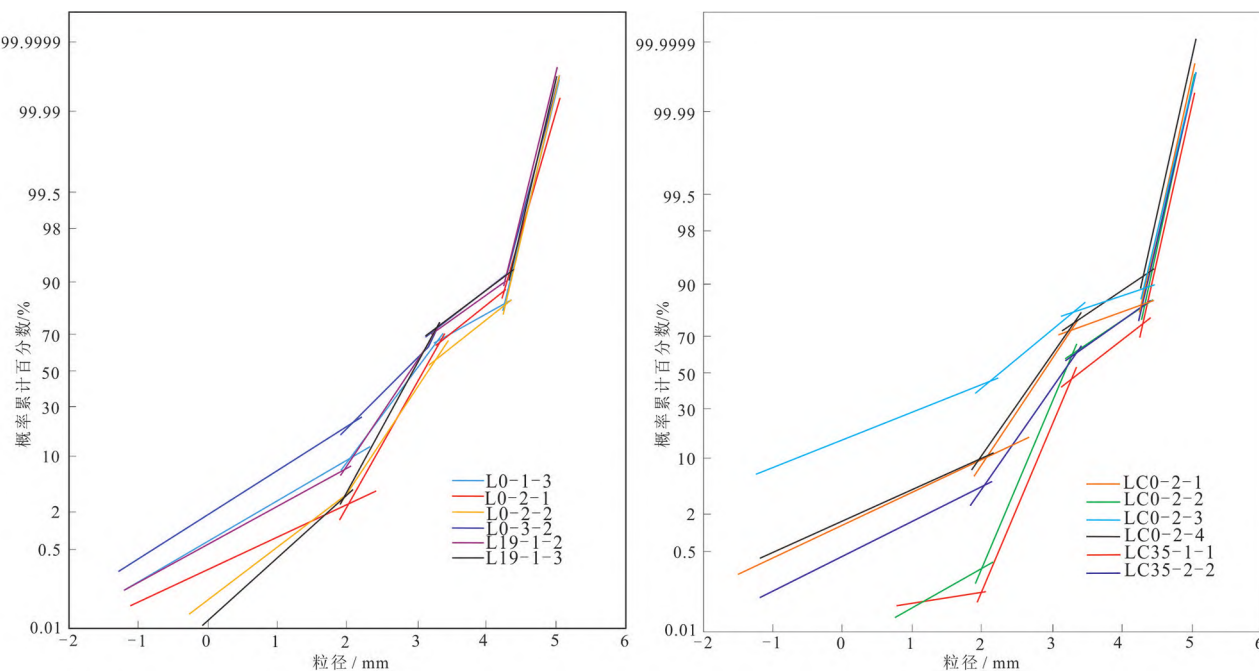


图3 研究区不同钻孔上干柴沟组粒度概率累积曲线

Fig.3 Accumulated frequency curve of grain size probability of Shangganachaigou formation in boreholes in the study area

3 研究区地球物理特征

3.1 测井地球物理特征

研究区内目的层岩石物性参数如表1所示。

区内上干柴沟组砾岩、含砾砂岩、粗砂岩及中砂岩,一般具有高电阻率、高自然电位异常、高声速(低时差)、低天然伽马照射量率的测井曲线。声波时差参数随着岩石的致密程度和粒级呈负相关。泥岩、粉砂岩的井径大于其他岩性的井径,并随着岩石粒级和致密程度的增大反而变小,而致密砾岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩的井径值变化不大。由于岩石中随泥质、有机物含量的增加,其天然放射性强度增加,故泥岩、粉砂质泥岩放射性伽马值相对较高,但砂岩中细砂岩、粗砂岩自然伽马平均值较高,且变化范围较大,是上干柴沟组主要见矿岩性。泥岩和粉砂岩自然电位值偏低,而非渗透性岩层泥岩、粉砂岩相对于渗透性岩层细砂岩、中砂岩

通过对砂岩粒度分析比较,由图2所见,研究区砂体呈现出明显的由西北向东南碎屑颗粒成熟度增高的情况,碎屑物的物源较近,水动力较强,具有明显的冲积扇—辫状河三角洲沉积相变特征,且砂体整体较为疏松、易碎,发育大量孔隙,连通性较好,为含铀含氧水提供良好的物质来源及运移通道^[14]。

和粗砂岩其自然电位值具有明显差异,这对于砂泥岩剖面有着显著的判别标志。但因为本区岩性分选性较差,视电阻率及密度受泥质含量的影响较大,就同岩性而言,其数值变化范围较大。

依据地球物理测井显示,研究区上干柴沟组中砂岩 γ 测井曲线峰值呈现单峰、双峰,可作为砂岩型铀矿找矿标志。综合岩性特征, γ 测井曲线双峰值出现在氧化砂岩顶底部、半氧化砂体中部,可对该砂体进行小间距钻探追踪; γ 曲线单峰值出现在灰色调还原性砂体中部、下部时,可对该砂体退向氧化一侧小间距钻孔施工(图4)。

3.2 放射性特征

研究区内构造样式以盆缘逆冲断裂、褶皱为主,控制柴北缘油气、煤炭等资源的分布^[15]。侏罗系和古、新近系砂体中层间氧化带发育,区内深部油气、煤炭丰富,深部油气通过断裂等破裂构造向浅部地层迁移耗散,形成层间还原障,有利于构造—

表 1 柴达木盆地北缘目的层主要岩性物性参数统计
Table1 Statistics on physical parameters of main rocks in the target layer of Qaidam Basin

地层	岩性	密度/(g·cm ⁻³)		电阻率/(Ω·m)		自然伽马/cps		井径/mm		声波时差/(us·m ⁻¹)		自然电位/mV	
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
上干柴沟组 (N _{1g})	泥岩	2.07~2.80	2.20	3.66~69.98	16.00	1.57~2 052.38	120.53	31.08~247.00	126.32	171.72~701.69	372.17	-6.38~-3.26	-4.53
	粉砂岩	2.01~2.79	2.21	6.23~189.79	19.33	1.24~508.33	100.91	28.55~247.10	126.93	110.79~834.20	371.50	-8.81~-4.62	-5.83
	细砂岩	2.06~2.90	2.21	4.65~64.65	18.05	1.81~552.38	100.07	64.33~246.71	108.31	192.47~738.17	349.55	-11.93~-5.38	-8.17
	中砂岩	2.01~2.74	2.25	6.88~28.34	18.68	1.57~290.48	63.97	62.58~215.15	104.63	187.56~730.25	360.68	-12.68~-4.42	-9.34
	粗砂岩	2.09~2.66	2.31	6.52~50.07	21.04	1.90~400.00	67.96	75.12~143.59	101.46	259.11~479.57	334.69	-17.43~-5.87	-12.68
	含砾砂岩	2.09~2.52	2.29	11.22~62.46	28.68	5.38~211.90	76.51	67.21~136.91	103.73	240.44~481.39	316.62	-26.78~-5.45	-17.65
	砾岩	2.06~2.77	2.32	7.35~190.81	32.18	1.90~223.81	66.49	88.04~214.93	117.05	187.14~938.93	415.06	-33.99~-13.58	-23.48

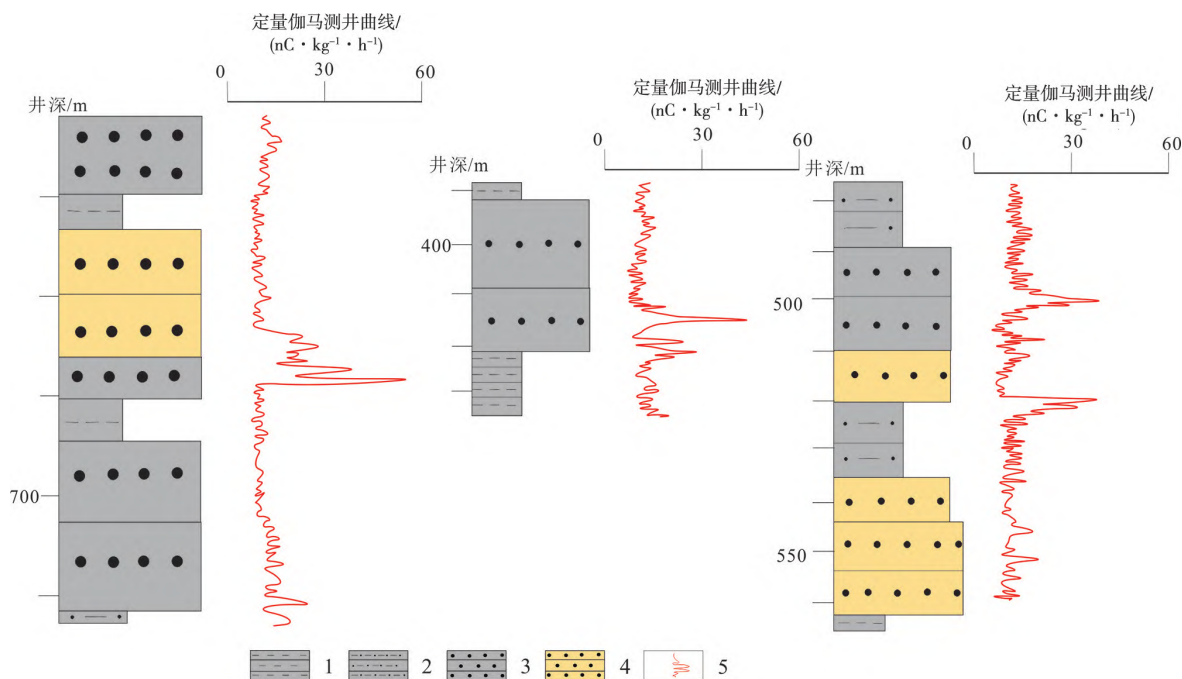


图 4 柴北缘上干柴沟组岩石铀矿化特征

Fig.4 Uranium mineralization characteristics of Shangganchaigou Formation

1—灰色泥岩；2—灰色泥质粉砂岩；3—灰色砂岩；4—浅黄色砂岩；5—定量伽马测井曲线。

地球化学障型与层间氧化带型铀矿化形成^[9,16-17]，油气-煤-铀共生现象明显。马海背斜作为柴北缘主要的油气圈闭，与放射性异常的分布有密切的空间联系。

图 5 为马海地段地面伽马能谱-地质剖面图。该剖面横穿整个马海背斜，出露地层主要有新近系上干柴沟组(N_{1g})，为该区主要目的层，岩性可见棕红色泥岩夹灰色泥质粉砂岩、灰色中砂岩与灰色粗砂岩互层，发育炭化植物碎屑，黄铁矿化，砂体疏松，

整体为一套辫状河三角洲前缘分流河道砂体。从图 5 可见，该条剖面整体铀、钍含量偏高，钾含量变化较为稳定，但上干柴沟组地层中见有明显铀异常带，其规模较大，带长约 60 m，异常带厚约 4~5 m，铀含量变化范围为 $(19.15 \sim 293.43) \times 10^{-6}$ ，平均值 21.69×10^{-6} ，异常范围 $(\geq 61 \times 10^{-6})$ 较大，铀异常峰值最高达 293.43×10^{-6} ，含矿岩性为灰色中砂岩。且在铀异常带其钍含量呈现正相关变化，最高为 389.56×10^{-6} ，故该地层呈现铀高场、钍偏高场的放射性特征。

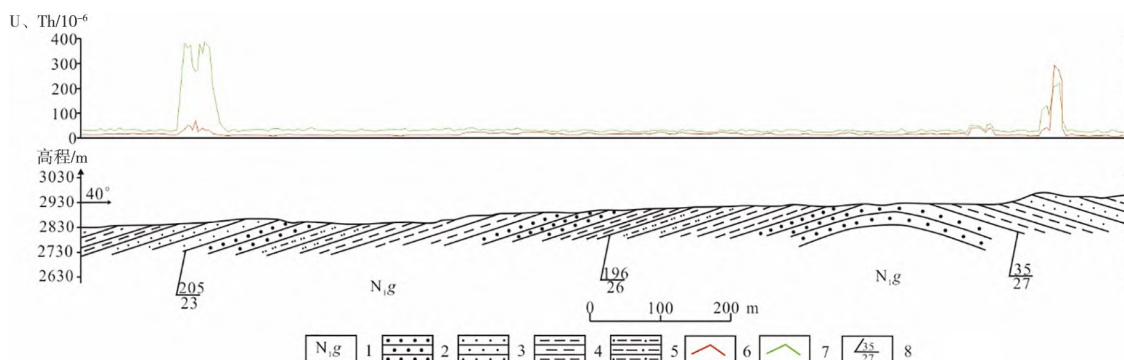


图 5 马海地区地面伽马能谱-地质剖面图

Fig.5 Gamma ray spectrometry-geological section in Mahai area

1—新近系上干柴沟组；2—粗砂岩；3—中砂岩；4—泥岩；5—泥质粉砂岩；6—铀含量；7—钍含量；8—产状。

因此，基于马海地区的铀异常点(带)，在马海背斜围绕该异常带进行活性炭面积测量，探测深部

铀异常发育情况。马海地区铀矿化受近北西向氧化前锋线控制，测线布置与区内氧化前锋线大致垂

直,方位角 40° ,以 $500\text{ m}\times 100\text{ m}$ 网度控制全区,矿化段加密点位,测线53条,测量点5 115点,测量面积 255.8 km^2 。

活性炭面积测量显示,区内氡浓度背景值东南部明显高于西北部,故东南部具有较大铀成矿潜力(图6)。由图6可见,研究区氡异常晕带整体分为3部分,即条带状展布高场区、零星分布的偏高场区和低值场区。以线性排列的串珠状异常点(h_{1-1} 、 h_{1-2} 、 h_{1-3} 、 h_{1-4} 和 h_{6-1} 、 h_{6-2} 、 h_{6-3} 、 h_{6-4})构成的氡浓度异常带 H_1 和 H_6 清晰地表征出断裂存在的特征。由氡异常(h_{8-1} 、 h_{8-2} 、 h_{8-3})组成近东西向异常带 H_8 沿马北121井-马北123井展布,长约8 km,宽约300 m,面积约 2.4 km^2 ,异常最大值 $7\,817\text{ Bq/m}^3$,且该地段褶皱发育,使得氡异常中心迁移。 h_{10} 异常点(氡浓度最大值 $7\,816.0\text{ Bq/m}^3$)位于该异常岩性渐变带上,推

断 h_{10} 异常为第四系覆盖下隐伏放射性值较高的上干柴沟组地层对应反映。沿马海背斜两翼分布有两条氡异常带,一条是以中10井-马11井-中13井-中15井构成的北东向的线性异常带,异常最大值为 $10\,248.9\text{ Bq/m}^3$,异常带长约5 km,宽约500 m,面积约 2.5 km^2 ,为全区氡异常表征铀成矿最有利区块。马深2井的 h_{2-3} (氡浓度最大值 $4\,253.9\text{ Bq/m}^3$)和 h_{2-4} (氡浓度最大值 $6\,504.4\text{ Bq/m}^3$),马9井的 h_{2-5} (氡浓度最大值 $5\,119.4\text{ Bq/m}^3$),马西4井的 h_{2-6} (氡浓度最大值 $4\,543.7\text{ Bq/m}^3$),构成走向北西向的环状异常带。马海地区能谱剖面上显示的两个异常点(带)HFU-1和HFU-2,从活性炭氡浓度异常平面图上可以看出,HFU-1异常点呈现氡浓度偏高场,HFU-2异常点为氡浓度异常偏高场-高场的过渡区,走向北北东向,与地面伽马能谱显示较为一致。

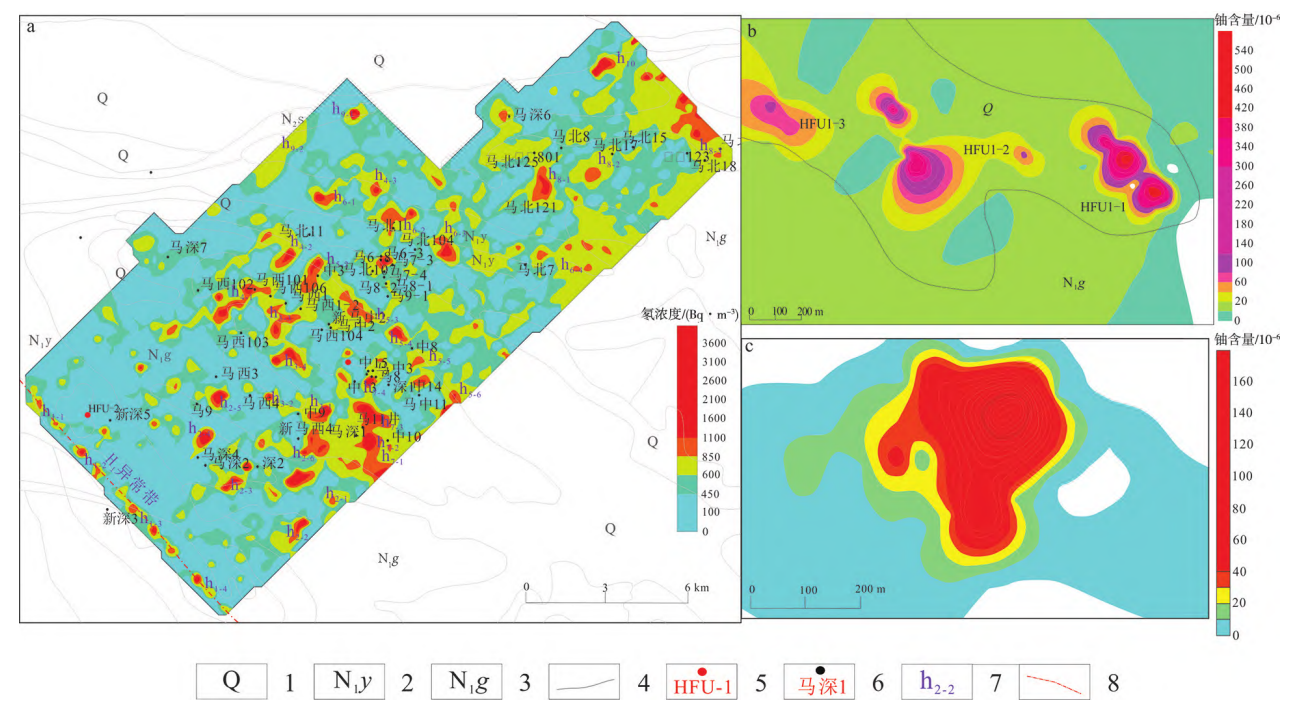


图6 马海地区活性炭测量氡浓度异常平面图(a)、HFU-1异常地面伽马能谱铀含量平面异常图(b)、HFU-2异常地面伽马能谱铀含量平面异常图(c)

Fig.6 Anomaly map of radon measured by activated carbon (a), uranium content in HFU-1 anomaly (b) and uranium content in HFU-2 anomaly (c) in Mahai area
1—第四系; 2—新近系上新统上油砂山组; 3—新近系中新统上干柴沟组; 4—地层界线; 5—地面伽马能谱铀异常点; 6—石油钻孔; 7—氡浓度异常编号; 8—氡浓度异常带。

3.3 电性剖面特征

通过对柴达木盆地北缘找矿目标层放射性特征分析可知,区内浅地表目标层中显示的铀异常点(带)往往表征其深部铀矿体发育特征。砂岩型铀矿稳定发育的砂体是铀成矿的前提。据此,在研究

区评价圈定的铀异常发育成矿有利区带进行可控源音频大地电磁研究,查明目的层深部空间展布特征,划分铀成矿有利的构造部位。故选择典型剖面进行研究,预测深部找矿靶区铀成矿潜力。

基于能谱、活性炭测量显示的放射性异常区域,

依据区内地质资料选择地势相对较为平缓地段开展CSAMT测量,大致查明地层结构形态和断裂构造发育情况,推断解释找矿目标层及砂体空间展布特征。本次CSAMT测量基于野外实际条件在马海和绿草山各布设测线1条,测线垂直于构造走向,测线方位分别为NE47°、NE40°(图2)。供电偶极距AB=1 200 m,测量电极距MN=100 m,收发距为6 km,测线点距为100 m。供电电流一般为2~20 A,最大电流可达22 A,发射频率选择0.125~8 192 Hz,采用多次叠加观测以提高信噪比。

图7为马海可控源音频大地电磁测深反演电阻率断面图,该测线横穿马海背斜,整条断面视电阻率偏低,在纵向上电阻率呈现明显的高低分层,横向电阻率连续性较好。因此,依据地质资料及电阻率纵横向变化特征,研究区地层电阻率特征纵向上主要划分为4个电性层:第1电性层电阻率变化范围约为5~12 $\Omega\cdot\text{m}$,为相对中阻层,自南西向北东逐渐减薄,推测为下油砂山组,岩性以粉砂岩、砂岩及泥岩为主;且在500~1 900 m段团块状相对中高阻体,推测为第四系砂土、砾石;第2电性层电阻率小于5 $\Omega\cdot\text{m}$,为相对中低阻层,电性层在背斜轴部厚度最小,向南北两侧逐渐增厚,推测为上干柴沟组,岩性以泥岩夹砂岩为

主。其平距4 400~5 200 m、7 000~8 800 m段,反演电阻率8~12 $\Omega\cdot\text{m}$,呈透镜状展布,推测为上干柴沟组砂体。第3电性层电阻率变化范围约为2~6 $\Omega\cdot\text{m}$,为相对低阻层,其埋深不一,自南西向北东逐渐变浅,推测为下干柴沟组厚层泥岩,为区内标志层。第4电性层电阻率变化范围约为8~100 $\Omega\cdot\text{m}$,电阻率值向深部快速增大,为相对中高阻层,等值线呈对称的密集、水平层状分布,由中心至两侧向深部逐渐收缩,推测为路乐河组砂砾岩、砾岩。

依据地质资料及电阻率纵横向变化特征,解译出3条断裂,倾向均为北东,产状较陡,与地质观测基本吻合,由南向北分别是F₁、F₂、F₃,依次位于平距750 m、4 500 m、11 050 m处。平距750 m处,反演电阻率等值线呈漏斗状向下延伸,推测为断裂反映,F₁为正断层,切割深度较大,从地表向地层深部延伸大于1 000 m。平距4 500 m左右两侧反演电阻率差异较大,等值线呈现扭曲、错断特征,推测为断裂F₂的反映,断裂性质不明,其切穿上干柴沟组,至地表形迹被掩盖。平距11 050 m处附近,反演电阻率等值线出现扭曲变形,且有向下错动趋势,推测为断裂F₃的反映,为正断层,其切割深度相较于前两条断裂深度较浅,为马海背斜与中部次级凹陷的分界断裂。

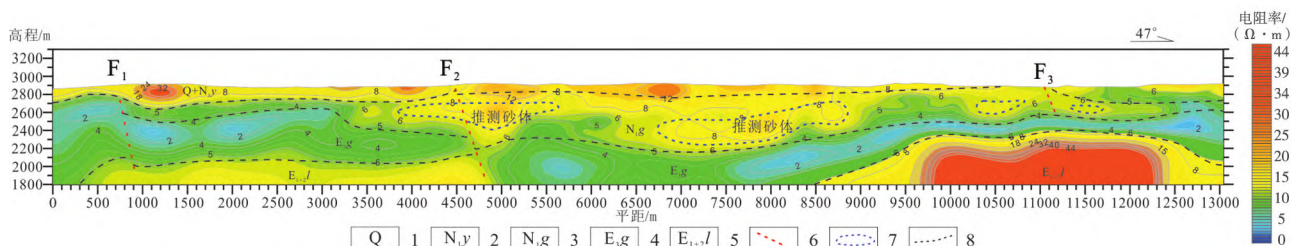


图7 马海地区A—A'线CSAMT反演电阻率断面及地质解释图

Fig.7 CSAMT inverted resistivity section and geology interpretation of line A-A' in Mahai area

1—第四系; 2—新近系上新统上油砂山组; 3—新近系中新统上干柴沟组; 4—古近系渐新统下干柴沟组; 5—古近系古-始新统路乐河组; 6—推断断层; 7—推断砂体范围; 8—推断地质界线。

从绿草山可测线反演电阻率断面图可以看出,该断面电性结构较为稳定,由浅至深,整体呈高-低-中-高的电性特征(图8)。顶部断面电阻率变化范围约50~200 $\Omega\cdot\text{m}$,为相对高阻层,以近水平层状展布,推测为第四系松散沉积物。断面中部电阻率小于20 $\Omega\cdot\text{m}$,为相对低阻层,自南西向北东方向厚度逐渐减薄,推测为上干柴沟组厚层泥岩,夹薄层砂岩。第3电性层电阻率变化范围约为20~36 $\Omega\cdot\text{m}$,为相对中阻层,呈透镜状展布,自南西向北东方向厚度逐渐减薄,至山前尖灭,推测为上干柴沟组,岩性以砂岩、泥岩为主。其

平距450~1 200 m、2 650~3 050 m、4 050~5 150 m段,反演电阻率约为32~36 $\Omega\cdot\text{m}$,等值线呈透镜状展布,推测为上干柴沟组砂体。断面底部为相对高阻层,电阻率变化范围大于40 $\Omega\cdot\text{m}$,且向深部快速增大,呈近水平层状展布,自南西向北东缓慢抬升,至山前迅速隆起,推断为路乐河组砂砾岩、砾岩。

断面3 850 m处,反演电阻率等值线在水平方向上出现明显的错动抬升,推测存在断裂F₁,倾向北东,倾角约60°,为逆断层,断裂切割地层较深,从地表向深部延伸至海拔-1 400 m以下。

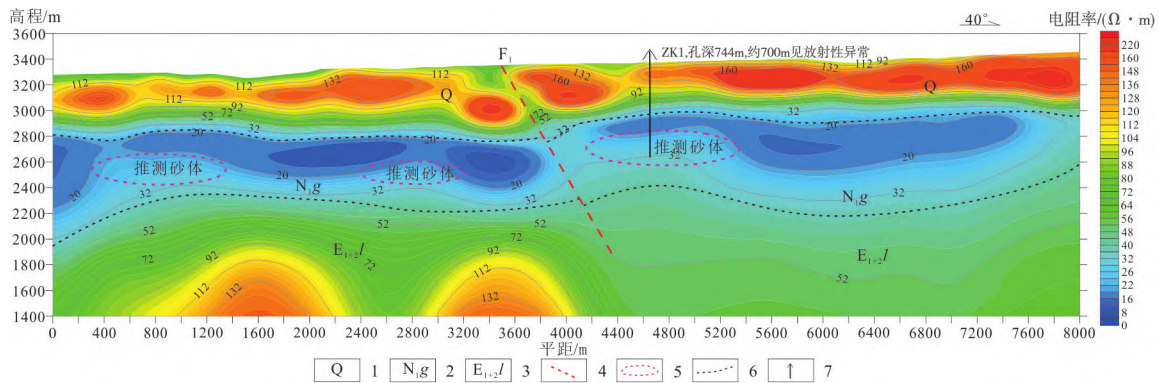


图8 绿草山地区B—B'线CSAMT反演电阻率断面及地质解释图

Fig.8 CSAMT inverted resistivity section and geology interpretation of line B-B' in Lücaoshan area

1—第四系; 2—新近系中新统上干柴沟组; 3—古近系渐新统路乐河组; 4—推断断层; 5—推断砂体范围; 6—推断地质界线; 7—施工钻孔。

4 找矿预测与验证

4.1 铀成矿靶区预测

砂岩型铀矿目的层砂体电性特征一般和岩石泥质含量相关,铀矿化所赋存的目标砂体一般呈中高阻特征,而区内地面浅层见有的放射性异常往往和地下深部铀矿化特征密切相关。

马海地区为一套冲积扇—辫状河—三角洲沉积体系。从电性剖面特征来看,马海地区目的层砂体发育,以灰色、浅灰色中、细砂岩夹粗砂岩、含砾粗砂岩为主,泥质、泥钙质胶结,固结程度疏松—较疏松,泥—砂—泥结构较好,构造相对稳定,整个马海地区呈向南倾的斜坡构造,部分深层次断裂成为原生油气藏进行二次运移的通道,易于形成还原环境,为砂岩型铀成矿提供有利的还原保障,具有一定的成矿潜力。而马海地区地面伽马能谱和活性炭剖面显示,研究区出露的找矿目的层中均有高铀的放射性特征,且局部地层中见有较高铀异常点(带)往往指示深部铀矿体可能发育的位置及铀矿品位^[9]。

绿草山地处红山凹陷,发育较好的构造斜坡带。依据典型电性剖面来看,区内呈高—低—中—高阻电性特征,结合已有地质资料,上干柴沟组发育为一套辫状河三角洲前缘、前三三角洲相沉积体系,砂体整体呈现良好的泥—砂—泥结构。区内柴达木岩体广泛出露,粗粒发育,剥蚀程度高,Th/U值高达11.91,地表放射性异常点(带)较多,已施工钻孔ZK0-1中发现铀矿化段,厚度0.30 m,品位0.010 5%,平米铀量0.07 kg/m²,4层铀异常,异常品位0.005 7%~0.006 7%,异常厚度0.10~1.50 m,埋深586.60~712.90 m,主要赋存于灰色粗砂岩中。已有钻孔放射性异常显示在第三系目

的层中砂岩型铀成矿潜力较大。

根据反演与推断解释地质结果,柴达木盆地北缘马海和绿草山地区上干柴沟组地层展布较好,砂体较为发育。区内上干柴沟组地层中—高—低视电阻率异常梯度带分布清晰,基本反映了目的层砂—泥岩层及断裂构造展布特征。放射性异常在区内变化较强,已有地质资料证实,在浅地表见有的铀高放射性异常之间、铀异常带局部膨大部位为找矿的有利部位。

综上所述,研究区找矿目的层中高阻电性层和地表高铀放射性异常是寻找砂岩型铀矿的找矿标志。在柴北缘马海和绿草山地区稳定的中高阻电性层、浅层放射性异常点(带)划分成矿有利部位,预测找矿靶区(图9)。

4.2 预测结果验证

基于上述规律并结合已有地质信息,在马海和绿草山地区成矿有利部位相继设计钻孔ZKm-1、ZK1-2,探索上干柴沟组砂体、层间氧化带发育特征及含矿性,对预测的找矿靶区进行验证。后期钻孔揭露显示,ZKm-1中发育厚大砂体4层,平均厚度48 m,砂体疏松,岩性主要为中细砂岩,局部夹有粗砂岩。在埋深121.90~123.10 m处见有2层铀矿化,矿(化)体厚度1.2 m,平均品位0.015 6%,平米铀量0.2 kg/m²。ZK1-2见有8层砂体发育,厚度4~40 m,以中细砂岩为主,夹有薄层含砾粗砂岩。在577.00~606.10 m见有1层铀矿化和3层铀异常,厚度0.30~1.50 m,品位0.006 5%~0.010 0%,赋矿岩性为中砂岩,且发育炭化植物碎屑。钻探验证表明,本次预测的找矿靶区柴北缘马海、绿草山地区深部发育的有利砂体和多层铀矿化与预测结果相对吻合,且含矿层位砂体连续性较好,预示着深部

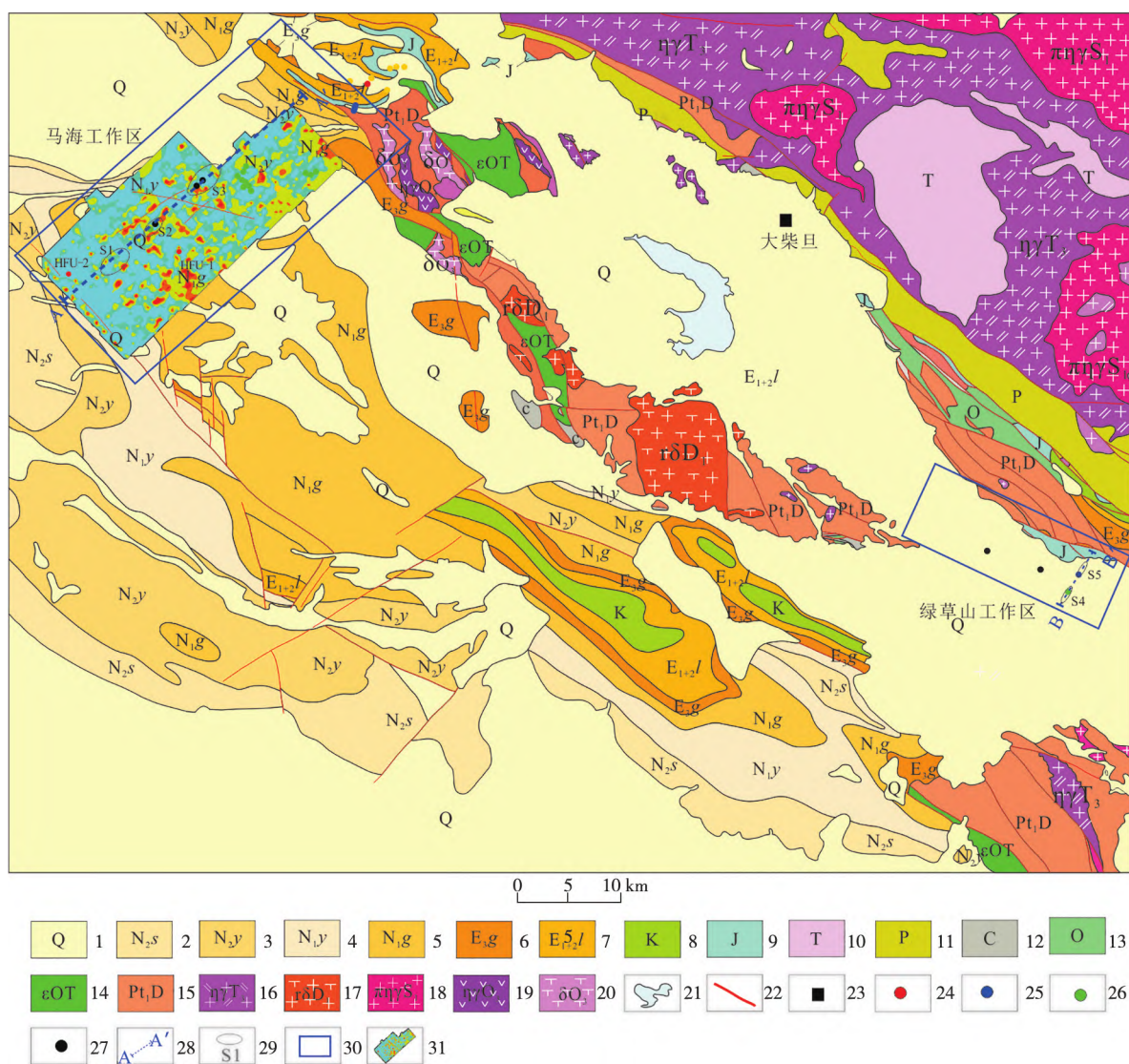


图9 研究区铀成矿预测图

Fig.9 Prognosis map of uranium metallogenetic prospects in the study area

1—第四系；2—新近系上新统狮子沟组；3—新近系上新统上油砂山组；4—新近系中新统下油砂山组；5—新近系中新统上干柴沟组；6—古近系渐新统下干柴沟组；7—古近系渐新统路乐河组；8—白垩系；9—侏罗系；10—三叠系；11—二叠系；12—石炭系；13—奥陶系；14—下古生界滩间山群；15—古元古界达肯达坂群；16—三叠系二长花岗岩；17—泥盆系二长花岗岩；18—志留系二长花岗岩；19—奥陶系二长花岗岩；20—奥陶系闪长岩；21—湖泊；22—推断层；23—地名；24—工业铀矿孔；25—矿化孔；26—异常孔；27—无矿孔；28—CSAMT测线；29—推断成矿砂体范围；30—工作区范围；31—氡异常分布范围。

铀矿体在预测区内仍有延伸分布,具有较大的砂岩型铀成矿潜力。

5 结论

1)测井地球物理特征表明柴北缘找矿目的层岩石物性差异明显,泥-砂-砾岩性判别标志清晰,氧化与还原砂体均有发育,灰色还原砂体(中砂、粗砂)放射性值较高,存在铀异常或矿化赋存。

2)能谱-地质剖面显示,研究区马海地段找矿目地层具有高铀、高钍、低钾的放射性特征。重点地段开展的活性炭面积测量,进一步查明了深部铀

异常发育特征及范围,偏高异常场晕与能谱异常吻合部位是找矿有利部位。

3)CSAMT测量查明了研究区马海和绿草山地段深部地层结构及断裂构造发育特征、目的层及砂体的空间展布形态,预测了铀成矿有利的构造部位。

4)通过分析柴北缘马海和绿草山地区砂岩型铀矿地球物理响应特征,认为灰色还原砂体、浅层放射性异常带、目的层上干柴沟组中稳定的中高阻电性特征砂体,可作为柴北缘地区找矿标志,圈定找矿靶区,且钻探验证结果良好。

[参考文献]

- [1] 蔡煜琦,张金带,李子颖,等.中国铀矿资源特征及成矿规律概要[J].地质学报,2015,89(6):1051-1069.
CAI Yuqi, ZHANG Jindai, LI Ziyang, et al. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 1051-1069 (in Chinese).
- [2] 张金带,徐高中,陈安平,等.我国可地浸砂岩型铀矿成矿模式初步探讨[J].铀矿地质,2005,21(3):139-145.
ZHANG Jindai, XU Gaozhong, CHEN Anping, et al. Preliminary discussion on uranium metallogenic models of China's in-situ leachable sandstone-type uranium deposits[J]. Uranium Geology, 2005, 21(3): 139-145 (in Chinese).
- [3] 封志兵,聂逢君,宁媛丽,等.盆地内部砂岩型铀矿找矿技术的设计与探讨[J].地质学报,2022,96(6):2217-2229.
FENG Zhibing, NIE Fengjun, NING Yuanli, et al. Discussion and design of exploration technology for sandstone-type uranium deposits in the interior of the sedimentary basins[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(6): 2217-2229 (in Chinese).
- [4] 吴光大,葛肖虹,刘永江,等.柴达木盆地地球物理场及其深部地质特征[J].新疆石油地质,2005,26(1):13-16.
WU Guangda, GE Xiaohong, LIU Yongjiang, et al. The geophysical field and deep geological characteristics of the Qaidam Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(1): 13-16 (in Chinese).
- [5] 潘语录.柴北缘含煤区地层测井物性特征分析[J].中国煤炭地质,2011,23(12):42-45.
PAN Yulu. Strata well logging characteristic analysis of coal-bearing area on north margin of Qaidam Basin [J]. Coal Geology of China, 2011, 23(12): 42-45 (in Chinese).
- [6] 张建太.磁场信息的提取对构造识别的应用研究[J].地球物理学进展,2018,33(5):2064-2069.
ZHANG Jiantai. Magnetic field data extraction for applied research on tectonic identification[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 2064-2069 (in Chinese).
- [7] 艾虎,焦智伟,王泽霞,等.CSAMT法在柴北缘砂岩型铀矿勘查砂体探测中的应用[J].矿产勘查,2020,11(9):1966-1973.
AI Hu, JIAO Zhiwei, WANG Zexia, et al. Application of CSAMT method in sand-body detection of sandstone type uranium exploration in north Qaidam[J]. Mineral Exploration, 2020, 11(9): 1966-1973 (in Chinese).
- [8] 陈聪,赵兴齐,陈涛,等.柴达木盆地鱼卡地区电磁场特征与铀成矿有利环境分析[J].地质论评,2021,67(增刊):85-86.
CHEN Cong, ZHAO Xingqi, CHEN Tao, et al. Analysis of electrical and magnetic characteristics and favorable geological environment for uranium Mineralization in Yuqia area, Qaidam Basin[J]. Geological Review, 2021, 67(S1): 85-86 (in Chinese).
- [9] 时志浩,陈擎,叶雷刚,等.柴达木盆地西缘砂岩型铀矿目标层地球物理响应特征[J].地质与勘探,2022,58(2):258-273.
SHI Zhihao, CHEN Qin, YE Leigang, et al. Geophysical response characteristics of the target layer of sandstone-type uranium deposits in the western margin of Qaidam Basin[J]. Geology of Exploration, 2022, 58(2): 258-273 (in Chinese).
- [10] 陈擎,王继斌,陈斌,等.柴达木盆地古-新近系砂岩型铀矿找矿新发现及其找矿意义[J].东华理工大学学报(自然科学版),2020,43(4):346-354.
CHEN Qin, WANG Jibin, CHEN Bin, et al. New discovery and significance of Paleo-Neogene sandstone uranium ore prospecting in Qaidam Basin [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2020, 43(4): 346-354 (in Chinese).
- [11] 邵恒博,张泽豪,王继斌,等.柴达木盆地北缘西段中侏罗统层序地层特征及与铀富集关系[J].铀矿地质,2021,37(4):603-613.
SHAO Hengbo, ZHANG Zehao, WANG Jibin, et al. Sequence stratigraphy features of middle Jurassic and its relation to uranium enrichment in the west of northern margin of Qaidam Basin [J]. Uranium Geology, 2021, 37(4): 603-613 (in Chinese).
- [12] 刘林,宋哲,宋宪生,等.柴达木盆地北缘中生代地质构造演化与砂岩型铀成矿关系[J].东华理工大学学报(自然科学版),2008,31(4):306-312.
LIU Lin, SONG Zhe, SONG Xiansheng, et al. Study on the relationships between the structural evolution and sandstone-type uranium mineralization in Mesozoic era and Cenozoic era in the northern of Chaidam Basin [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2008, 31(4): 306-312 (in Chinese).
- [13] 廉康,赵兴齐,王继斌,等.柴北缘上干柴沟组砂体特征及铀成矿作用研究[J].东华理工大学学报(自然科学版),2019,42(4):311-319.
LIAN Kang, ZHAO Xingqi, WANG Jibin, et al. Characteristics of sand body and uranium mineralization in the upper Ganchaigou formation in the northern margin of Qaidam Basin [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2019, 42(4): 311-319 (in Chinese).
- [14] 张淼,廉康,郭倩怡,等.柴北缘绿草山上干柴沟组沉积-构造特征及与铀矿化关系[J].铀矿地质,2021,37(2):182-191.
ZHANG Miao, LIAN Kang, GUO Qianyi, et al. Sedimentary and structural characteristics and uranium mineralization of shangganchaigou formation in lucaoshan, northern margin of Qaidam Basin [J]. Uranium Geology, 2021, 37(2): 182-191

- (in Chinese).
- [15] 方世虎,赵孟军,张水昌,等.柴达木盆地北缘构造控藏特征与油气勘探方向[J].地学前缘,2013,20(5):132-138.
FANG Shihu, ZHAO Mengjun, ZHANG Shuichang, et al. Structural control on hydrocarbon accumulation and its implication for petroleum exploration in Northern Qaidam Basin[J].Earth Science Frontiers, 2013, 20(5): 132-138 (in Chinese).
- [16] 黄净白,李胜祥.试论我国古层间氧化带砂岩型铀矿床成矿特点、成矿模式及找矿前景[J].铀矿地质,2007,23(1): 7-16.
HUANG Jingbai, LI Shengxiang. Metallogenic characteristics, model and exploration prospect for the paleo-interlayer-oxidation type sandstone-hosted uranium deposits in China [J]. Uranium Geology, 2007, 23(1): 7-16 (in Chinese).
- [17] 权志高,徐高中,付成铭,等.柴北缘地区古层间氧化作用及古层间氧化带型铀矿化[J].西北地质,2012,45(1): 159-164.
QUAN Zhigao, XU Gaozhong, FU Chengming, et al. The paleo-interlayer oxidation and the paleointerlayer oxidation type uranium mineralization in the north area of Qaidam Basin[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(1): 159-164 (in Chinese).

Geophysical Characteristics of the Target Layer and Exploration Prospects for Sandstone-type Uranium Deposits in Northern Qaidam Basin

ZHAO Xu, SHI Zhihao, XI Zhao, CHEN Qing

(Nuclear Industry Institute No. 203, Xi'an, Shaanxi 710086, China)

Abstract: Located in the northern margin of Qaidam uplift, the target layer in the northern Qaidam Basin is of favourable conditions for sand-type uranium mineralization. Based on uranium geological conditions, we analyzed the geophysical parameters of the target layer with multiple geophysical methods, such as geophysical logging, gamma ray spectrometry, activated carbon measurement and CSAMT method. The formation is of remarkable variation of geophysics parameters, the sandstone is with high uranium, high thorium and low potassium and uranium deposits in target sandstones are with high resistance. Sandstones are widely exist in the target layer Shangganchaigou Formation. The ternary structure of mud-sand-mud was quite well developed in the area, the grey reductant sandstones in the target layers, including fine sandstones and coarse sandstones, usually have high contents of uranium. According to geology-geophysics response characteristic, we concluded that radioactive anomaly is the direct clue to find out the location of uranium mineralization. Sector between two high radioactive areas, as well as inflated parts inside uranium anomaly area, are the potential positions for uranium deposits, which can be used as technical reference for uranium exploration in northern Qaidam Basin.

Keywords: the northern Qaidam Basin; sandstone-type uranium; geophysical characteristics; radioactivity